*Ferdowsi Civil Engineering, 38, 1, 2025. (65-82)*

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

# Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed

Research Article

Adel Shakibi Nezhad[1], Sajjad Gholipour[2], Masoud Makarchian[3]

*DOI: 10.22067/jfcei.2024.90055.1323*

## 1-Introduction

Using available materials such as cement, lime, slag, and other additives to improve and increase the bearing capacity of soft soils is considered a traditional method of soil stabilization. In contrast, adding metallic and non-metallic elements or replacing part of the soil with aggregates represents newer methods of soil reinforcement.

In soil improvement using the stone column method, a portion of the weak soil is excavated through pits or holes of a specific diameter and spacing. Coarse-grained materials are then poured into these pits and compacted, forming columns that transfer structural loads to more resistant soil layers.

Previous research involving 3D numerical analysis of stone column behavior in layered soil with geosynthetic materials indicates that bearing capacity increases by 166% in unreinforced cases. When stone columns are reinforced with geosynthetics, the bearing capacity can increase up to eight times, depending on the aggregates' friction angle, stiffness, and the geosynthetic's shape.

A study on geotextile performance—comparing horizontal placement with confinement inside stone columns—demonstrated that bearing capacity rises with increased geotextile stiffness. Additionally, horizontal reinforcement placement is more effective than confinement within stone columns in reducing settlement.

Most research on stone columns has focused on improving design methods, their role in accelerating consolidation settlement, analyzing failure mechanisms, and enhancing vertical bearing capacity. However, the lateral confinement of stone columns by geosynthetics under shear loads—particularly in sandy soils under higher overburden stresses at greater depths—has received less attention, highlighting the need for further investigation.

To address this gap, this research examines the shear behavior of geotextile-reinforced stone columns, focusing on their weakness due to insufficient confinement. Using a large-scale direct shear test device under high overburden stresses—an innovative aspect of this study—the shear strength of both single and grouped stone column samples (reinforced and unreinforced) in a sand bed is evaluated.

## 2 –Experimental program and material specifications

To prepare the direct shear test specimens, SP-type sand was used for the sand bed, while GP-type granular materials were used to construct the stone columns. Geotextile materials were employed to reinforce the stone columns; their full specifications are presented in Table 1.

A large-scale direct shear device with a shear box measuring 30 × 30 × 14 cm was used for the tests, in accordance with ASTM D-3080. The device consists of the following components: the main body, the shear box, the sample saturation box, the vertical and horizontal loading systems, and the measurement system.

The tests were conducted under vertical stresses of 100, 200, and 300 kPa at a shearing speed of 1 mm/min in a strain-controlled manner.

*Manuscript received October 1, 2024, Revised November 17, 2024, Accepted December 23, 2024.

[1] Master of Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University

[2] Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty of Khoy, Urmia University of Technology. **Email**: Sgholipour@uut.ac.ir

[3] Associate Professor of Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University.

**Table1. Specifications of sand bed and stone column materials**

| Parameters | Values | |
|---|---|---|
| Type of materials | Sand | Stone column |
| USCS | SP | GP |
| $G_s$ | 2.67 | 2.72 |
| $D_{10}$ (mm) | 0.21 | 1.9 |
| $C_u$ | 2.71 | 2.26 |
| $C_c$ | 0.85 | 1.42 |
| $D_r$ | 50% | 65.7 % |
| $\gamma_d$ (kN/m$^3$) | 14.5 | 15.84 |
| $\gamma_{d(max)}$ (kN/m$^3$) | 16.36 | 16.65 |
| $\gamma_{d(min)}$ (kN/m$^3$) | 13.03 | 14.49 |
| $c$ (kPa) | 3.4 | 2.3 |
| $\varphi$ (°) | 34.2 | 48.3 |

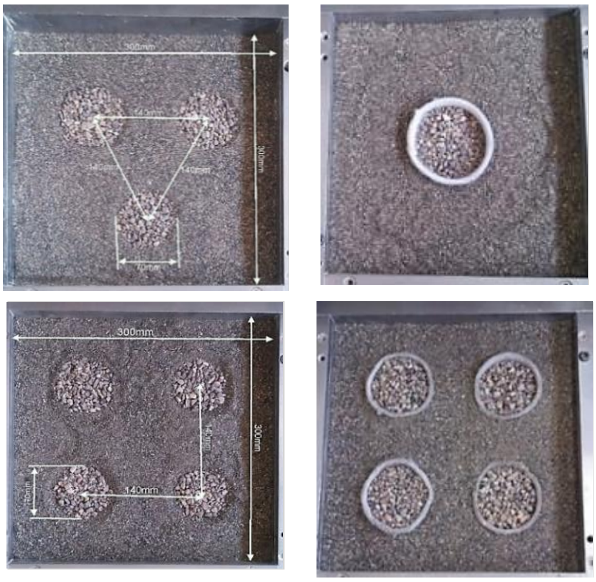


**Figure 1. Images of prepared samples with different stone column arrangements**

In this study, considering the dimensions of the shear test box, stone columns modeled in the sand bed were examined in single and group triangular and square arrangements with diameters of 7 and 9 cm. To prepare the samples, before the sand was poured, for the construction of stone columns, metal pipes were placed in a specific location in the shearing box and then sand was slowly poured from a certain height around the metal pipe. After preparing the sand bed, the stone column materials were poured into the pipe in layers of 5, 5 and 4 cm and each layer was compacted using a rod weighing 1.5 kg and with a drop height of 10 cm and then the metal pipe was slowly removed from the sand bed and the sample was placed in the testing position. Figure 1 shows images of prepared samples with different geometric arrangements.

After preparing the samples, to determine the shear strength parameters through large-scale direct shear testing, the samples were subjected to overhead stresses of 100, 200, and 300 kPa and horizontal loading at a speed of 1 mm/min under shear force, and the results were studied for different parameters. The effect of the parameters on the results is presented in detail in the results section.

**3- Test results**

Based on the results of the stress-strain diagrams in the case of a single unreinforced stone column, with increasing the $A_r$ amount (ratio of the stone column surface to the sand bed), a slight improvement in the shear strength and internal friction angle occurs compared to the bed soil without columns, which is due to the replacement of some of the bed soil with higher quality and more resistant soil.

The test results of stone columns reinforced with geotextile in the Figures 2 and 3 show that the maximum strength of single reinforced stone columns has increased shear strength compared to the case of bed sand. Also, the initial stiffness of the stone column group has increased compared to the bed sand, and the shear strength has also increased significantly. The reason for the increased resistance in single and group stone columns is the replacement of bed soil with stone column materials and the presence of geotextile containment. These enclosing, by mobilizing tensile stresses and preventing rupture during large displacements, have increased the shear resistance due to apparent adhesion in stone column specimens.

According to the trend of the curves, it is observed that the behavior of reinforced stone columns, unlike bed sand and unreinforced stone columns, has changed and they show strain hardening behavior and with increasing horizontal displacement, an increase in residual strength is observed in the tested samples.

Considering the increase in shear strength caused by stone columns located in the sand bed and the confinement of stone columns by geosynthetics, the main reasons for the improvement can be interpreted as follows; (1) the increase in shear strength can be caused by the creation of apparent adhesion between materials due to confinement effects, (2) the strain of geosynthetics during shear displacement can cause further confinement and create additional shear strength, (3) the lateral confinement effect

caused by the presence of adjacent stone columns in the soil between the group of stone columns can cause a greater increase in strength compared to individual columns.

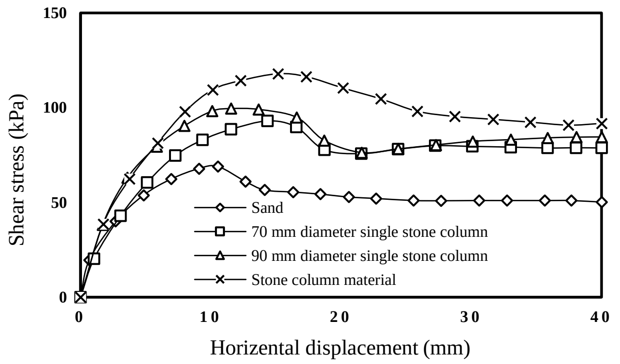



**Figure 2. Shear stress variations in confined single stone columns**

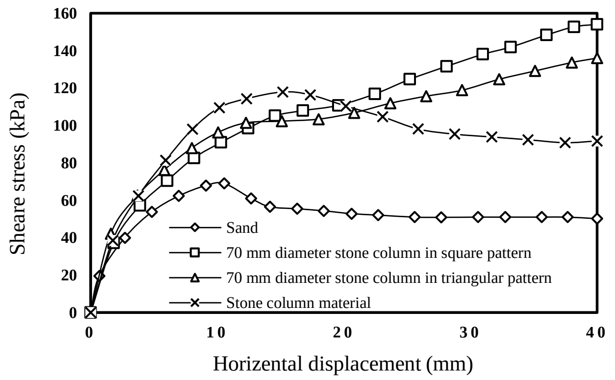



**Figure 3. Shear stress variations for a group of confined stone columns**

## 4- Conclusion

A summary of the most important results of the behavior of stone columns reinforced by geotextiles located in sandy soil is presented as follows:

- The behavior of specimens improved by single and group unreinforced stone columns is similar to that of a sand bed without stone columns, due to the lack of sufficient confining pressure from the loose soil of the bed.
- Using an unreinforced stone column in a loose sand bed with a surface area ratio of up to about 17% of the sand surface area has resulted in an increase of about 12% in the angle of internal friction of the sand for a single column and an increase of 26% for a group of columns, with no increase in adhesion.
- Unlike unreinforced samples, in all cases of the bed improved with reinforced stone columns, strain hardening behavior was observed after the samples reached maximum shear strength.
- The use of single reinforced stone columns has resulted in a 3 to 4 degree increase in the internal friction angle and 9.4 to 14 kPa in the adhesion of the sand bed, which indicates a significant increase in the adhesion rate of about 3 times.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

# بررسی رفتار برشی ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوسنتتیک در بستر ماسه‌ای*

**مقاله پژوهشی**

عادل شکیبی‌نژاد [۱] سجاد قلی‌پور [۲] مسعود مکارچیان [۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.90055.1323

**چکیده** *یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های سست، استفاده از ستون‌های سنگی است که باعث کاهش نشست، افزایش مقاو مت در برا بر روانگرا یی، به بود ظرفیت باربری، تسریع زهکشی قائم و افزایش سرعت تحکیم می‌شود. در این مقاله تأثیر محصورکننده‌های ژئوتکستایل بر روی پارامترهای باربری ، جانبی ما سه سست مسلح شده با ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور توسط دستگاه برش مستقیم ، بزرگ‌مق یاس، ستون های ، سنگی در حا لت‌ های غیرمسلح و مسلح شده با ژئوتکستایل مدل شده و تحت تنش‌های نرمال مختلف به صورت تکی و گروهی با قطرهای متفاوت مورد آزمایش ؛ قرار گرف تد. ن تایج بیانگر افزایش مقادیر مقاومت و پارامترهای برشی ماسه سست از طریق مسلح نمودن ستون‌های سنگی است، به طوری که استفاده از ستون سنگی غیره سلح در بستر ماسه سست با سطح مقطع تا ۱۷٪ سطح ماسه، باعث افزایش حدود ۱۲٪ در زاویه اصطکاک داخلی ما سه و ۷۰٪ در مقاو مت بر شی حداکثر شده ا ست. همچنین استفاده همزمان از ستون سنگی و ژئوتکستایل موجب بهبود جزئی حدود ۳٪ در میزان زاویه اصطکاک داخلی و تا حدود ۶۰٪ در م قدار چ سبندگی و ۲/۲ برابر در مقاومت برشی گردیده است.*

**واژه‌های کلیدی** ستون سنگی، بهسازی خاک، ژئوتکستایل، برش مستقیم بزرگ‌مقیاس.

## Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed

Adel Shakibi Nezhad Sajjad Gholipour Masoud Makarchian

**Abstract** There *are various methods to improve loose soils. One of the improvement methods is the use of stone columns. This method decrease settlement, increase the resistance to liquefaction, improve load bearing capacity, vertical drainage and increase the speed of consolidation. In this paper, the effect of geotextile enclosures on the lateral bearing capacity of loose soil reinforced by stone columns are investigated. In order to study the behavior of stone columns, large-Scale Direct shear apparatus was used. The stone columns modeled in this apparatus have been tested in unreinforced and reinforced with geotextile materials under different normal stresses and in single and group mode with different diameters. The results show an increase in the value of the shear parameters of loose sand by reinforcing stone columns, so that the use of unreinforced stone column in the loose sand bed up to 17% of the sand surface increases the internal friction angle of the sand by 12% and 70% in the maximum shear strength, and the simultaneous use of the stone column and geotextile have led to a slight improvement of about 3% of the internal friction angle, and up to about 60% adhesion and 2.2 times the shear resistance depending on different parameters.*

**Key words** Stone Column, Soil Improvement, Geotextile, Large-Scale Direct Shear.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۷/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۰/۳ می‌باشد.

(۱) فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

(۲) نویسندهٔ مسئول؛ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه.

**Email**: sgholipour@uut.ac.ir

(۳) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

## مقدمه

استفاده از مصالح مختلف در دسترس همانند سیمان، آهک، سرباره و سایر افزودنی‌ها در خاک به منظور بهسازی و افزایش باربری خاک‌های نرم از روش‌های سنتی [1] و افزودن المان‌های فلزی [2] و غیرفلزی و همچنین جایگزینی بخشی از خاک توسط سنگدانه‌ها از روش‌های جدید تقویت و تسلیح خاک محسوب می‌شود. در بهسازی خاک به روش ستون سنگی، بخشی از خاک نامرغوب با حفر چاهک‌هایی با قطر و فاصله معین از یکدیگر، ریختن مصالح شن، ماسه و یا سنگریزه به درون چاهک‌ها و متراکم کردن آن‌ها، ستون‌هایی به صورت قائم ایجاد می‌شود که این ستون‌ها می‌توانند بار را از سازه به لایه‌های مقاوم خاک انتقال نمایند [3].

با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی رفتار و شناسایی ضعف‌ها و بهبود عملکرد ستون‌های سنگی انجام شده است. این تحقیقات در زمینه مدل‌های فیزیکی، مطالعات میدانی و تحلیل‌های عددی با بررسی رفتار ستون‌های تسلیح شده با ژئوسنتتیک‌ها در خاک‌های مختلف به‌ویژه خاک‌های نرم رسی انجام گرفته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که مقاومت برشی خاک بهسازی شده از طریق ستون سنگی، نسبت به حالت خاک بدون ستون سنگی، افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند [4,5].

استفاده از ستون‌های سنگی مسلح با لایه‌های افقی ژئوتکستایل جهت پایدارسازی شیب‌های ماسه‌ای نشان داد که ستون سنگی مسلح در وسط شیب تأثیر قابل توجهی تا حدود ۱/۵ برابر نسبت به حالت غیرمسلح در افزایش پایداری دارند [6].

تسلیح ستون‌های سنگی به وسیله محصورکننده‌های ژئوگرید و همچنین افزایش نسبت طول به قطر، باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی ستون‌های سنگی می‌شود [7].

بسیج نیروی کششی در محصورکننده‌های ژئوسنتتیکی در اثر بارگذاری افقی، ظرفیت باربری جانبی ستون‌های سنگی را افزایش می‌دهد. در ستون‌های سنگی غیرمسلح با افزایش $A_r$ (درصد مساحتی از صفحه برش که با ستون سنگی جایگزین شده است)، مقاومت برشی به صورت جزئی افزایش می‌یابد، در حالی که برای ستون‌های سنگی مسلح، با افزایش $A_r$ افزایش بیشتری در مقاومت برشی ایجاد می‌شود [8].

بررسی تأثیر عوامل مختلف بر کارایی ستون‌های سنگی در افزایش باربری و کاهش نشست زمین‌های سست نشان داد که با افزایش نسبت سطح ستون سنگی به دلیل افزایش برهم‌کنش ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و نیز افزایش مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون خاک اطراف ستون‌ها، تأثیر قابل توجهی بر باربری دارند [9].

ستون‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و ستون‌های سنگی غیرمسلح، پاسخ نرم‌تر همراه با نرم‌شوندگی کرنش را نسبت به بارگذاری نشان می‌دهند. تأثیر مسلح کردن ستون سنگی با افزایش قطر آن‌ها کاهش می‌یابد که این موضوع به علت کاهش تنش کششی در ژئوسنتتیک است [10].

با محصورسازی ستون‌های سنگی به وسیله مصالح ژئوسنتتیکی، انبساط جانبی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. ظرفیت باربری نهایی گروه ستون‌های سنگی مسلح، بیشتر از ظرفیت باربری گروه ستون‌های سنگی غیرمسلح اندازه‌گیری شده است [11].

اجرای ستون‌های سنگی در زمین‌های سست، موجب افزایش ظرفیت باربری زمین می‌شود که دلیل این موضوع وجود مصالح مرغوب‌تر و با زاویه اصطکاک داخلی بیشتر ستون سنگی است [12].

محصورکننده‌های ژئوتکستایل کرنش‌های شعاعی ستون سنگی را کاهش می‌دهند و با زیاد شدن کرنش محوری، میزان کاهش کرنش شعاعی کمتر می‌شود. زیاد شدن کرنش محوری، باعث افزایش چسبندگی مجازی در نمونه‌های مسلح می‌شود که در صورت استفاده از ژئوتکستایل‌های سخت‌تر، مقدار این چسبندگی افزایش بیشتری پیدا می‌کند [13].

بررسی رفتار برشی بسترهای رسی اصلاح شده با ستون‌های سنگی در ترکیب با ژئوتکستایل‌ها، توسط آزمایش برش مستقیم بزرگ مطالعه شده که نتایج نشانگر بهبود قابل توجه رفتار مقاومت برشی رس ناشی از محصورسازی ژئوتکستایل متناسب با خصوصیات مقاومتی و فیزیکی ستون‌های سنگی و ژئوتکستایل است [14].

پایداری خاکریزهای مسلح شده توسط ستون‌های سنگی و ژئوسنتتیک‌ها در خاک رس توسط تحلیل عددی بررسی و مشاهده گردید که ژئوسنتتیک‌ها مشارکت مهمی در پایداری

خاک‌های نرم ایفا می‌کنند و استفاده همزمان با ستون‌های سنگی، ریسک گسیختگی را کاهش می‌دهد [15].

تأثیر محصورسازی ژئوتکستایل بر رفتار ستون‌های سنگی توسط آزمایش‌های سه‌محوری بررسی شد که نتایج افزایش در مقاومت و زاویه اصطکاک نمونه‌ها را با وجود ژئوتکستایل نشان داد [16].

نتایج تحلیل عددی سه‌بعدی بررسی رفتار ستون‌های سنگی در خاک لایه‌ای به همراه ژئوسنتتیک‌ها نشان داد که درصد افزایش باربری در حالت ستون سنگی تنها ۱۶۶٪ و در حالت ستون سنگی مسلح با ژئوسنتتیک بسته به زاویه اصطکاک سنگدانه‌ها، سختی و اندازه ژئوسنتتیک حدود هشت برابر به دست آمد [17].

نتایج مطالعه مشابه دیگر در رابطه با تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بیانگر این است که هر دوی افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌های ستون سنگی و سختی مصالح ژئوسنتتیک محصور کننده، منجر به افزایش و بهبود کارایی می‌گردد، ولی کارآمدی پارامتر سختی ژئوسنتتیک نسبت به پارامتر زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای در این رابطه به مراتب بیشتر می‌باشد [18].

رفتار گروه شمع‌های دانه‌ای اصلاح شده با ضایعات تایر همراه با ژئوسنتتیک‌ها واقع بر بستر خاک نرم تحت بارهای استاتیکی و سیکلیک مطالعه شد که نتایج بیانگر افزایش ظرفیت باربری در حالت بدون ژئوسنتتیک حدود ۵۸٪ و در حالت استفاده از ژئوسنتتیک حدود ۳۳۵٪ می‌باشد و همچنین کاهش نشست تحت بارهای سیکلیک به طور متوسط حدود ۴۰٪ کمتر از حالت غیرمسلح گزارش شده است [19].

مطالعه عملکرد ژئوتکستایل در دو حالت قرارگیری به صورت افقی و محصور شده داخل ستون‌های سنگی از طریق آزمایش‌های بارگذاری صفحه نشان داد که با افزایش سختی ژئوتکستایل ظرفیت باربری افزایش یافته و به لحاظ کاهش نشست، قرارگیری تسلیح کننده به صورت افقی نسبت به حالت محصور شده داخل ستون سنگی کارایی بیشتری را دارد [20].

در مطالعه مشابه انجام گرفته در ایران توسط دیناروند و اردکانی [21]، استفاده از ستون سنگی به همراه ژئوتکستایل جهت بهسازی بستر ماسه‌ای با ارزیابی پارامترهای مختلف از جمله میزان ریزدانه خاک تا حدود ۴۰٪ تحت تنش‌های سربار تا ۶۰ کیلوپاسکال از طریق آزمایش‌های برش مستقیم بررسی شد که نتایج، افزایش مقاومت نهایی تا ۴۰٪ به ازای ستون‌های تکی و گروهی را نشان داد. همچنین بر اساس نتایج مشاهده گردید که با افزایش ریزدانه خاک، میزان بازدهی تأثیر ستون سنگی بر مقاومت برشی کاهش می‌یابد [21]. با وجود تشابه نوع مصالح بستر ماسه‌ای و دستگاه آزمایش برش مستقیم در تحقیق دیناروند و اردکانی [21] با تحقیق جاری، علاوه بر تفاوت در اندازه و ابعاد پارامترهای مورد بررسی، از تفاوت‌های مهم دو پژوهش میزان دانسیته نسبی بستر ماسه‌ای، میزان سربار اعمالی، میزان ریزدانه خاک، شرایط رطوبتی خاک بستر و بررسی آرایش مثلثی گروه ستون سنگی علاوه بر آرایش مربعی قابل ذکر می‌باشد.

تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف در رابطه با ستون‌های سنگی عموما متمرکز بر بهبود روش‌های طراحی، نقش ستون‌ها در تسریع نشست‌های تحکیمی، بررسی مکانیزم شکست، لغزش و انبساط جانبی این ستون‌ها و افزایش ظرفیت باربری قائم بوده است، در صورتی که کاربرد محصورسازی جانبی ستون‌های سنگی توسط ژئوسنتتیک‌ها تحت بارهای جانبی به ویژه در خاک‌های ماسه‌ای تحت تنش‌های سربار بزرگ‌تر متناظر با اعماق زیاد (ستون‌های با طول بزرگ‌تر) کمتر مورد توجه قرار گرفته است و ضرورت بررسی و مطالعه بیشتر این موضوع را می‌رساند. بنابراین در این تحقیق با توجه به ضعف برشی ستون‌های سنگی به دلیل عدم محصورشدگی کافی، برای بررسی رفتار ستون سنگی مسلح با مصالح ژئوتکستایل در برابر نیروی جانبی و برشی، از دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس تحت میزان تنش‌های سربار بزرگ‌تر متناسب با ستون‌های سنگی با عمق‌های بیشتر، استفاده شده است که به عنوان نوآوری تحقیق محسوب می‌گردد. به طوری که روند تغییرات مقاومت برشی نمونه‌های فیزیکی ستون سنگی تکی و گروهی، در دو حالت مسلح و غیرمسلح در بستر ماسه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های آزمایش برش مستقیم، از

ماسه سیلیسی جهت ایجاد بستر و از مصالح دانه‌ای سیلیسی جهت ساخت ستون‌های سنگی و همچنین به منظور تسلیح ستون‌های سنگی، از مصالح ژئوتکستایل استفاده شده است که تصاویر مصالح مورد اشاره در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

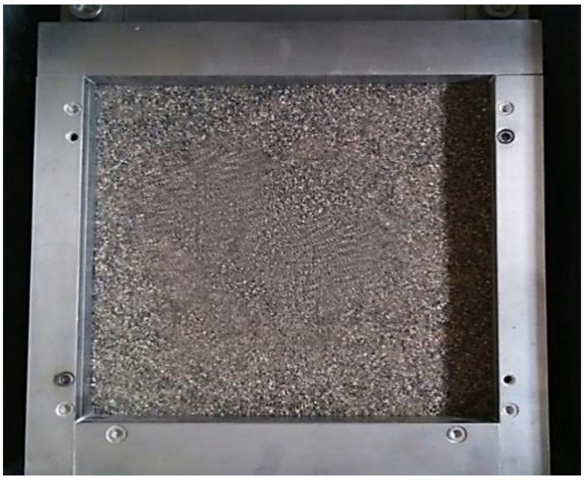
ماسه سیلیسی مورد استفاده که از رودخانه قره‌چای واقع در مسیر همدان ـ تهران و نزدیک به شهر جورقان همدان تهیه شده، بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی و منحنی دانه‌بندی در شکل (۲)، مطابق با سیستم طبقه‌بندی یکنواخت (متحد)، در رده و نام SP قرار می‌گیرد. پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای، توسط آزمایش برش مستقیم و با فرض دانسیته نسبی ($D_r$) ۵۰٪ اندازه‌گیری شد که بر این اساس به کمک رابطه (۱) مقدار وزن مخصوص خشک خاک به ازای دانسیته نسبی ۵۰٪ برابر با ۱۴/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب، مقدار زاویه اصطکاک داخلی °۳۴/۲ و چسبندگی آن در حدود ۳/۴ کیلوپاسکال به دست آمد. مشخصات کامل ماسه مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است.

$$D_{r} = \frac{\gamma_d - \gamma_{d\,(\min)}}{\gamma_{d\,(\max)} - \gamma_{d\,(\min)}} \times \frac{\gamma_{d\,(\max)}}{\gamma_d} \qquad (1)$$

در این رابطه، $D_r$ دانسیته نسبی، $\gamma_d$ وزن مخصوص خشک خاک متناظر با دانسیته نسبی مورد نظر، ($\gamma_{dmax}$) وزن مخصوص خشک بیشینه و ($\gamma_{dmin}$) وزن مخصوص خشک کمینه خاک است.

به منظور ساخت و ایجاد ستون‌های سنگی در بستر ماسه‌ای از مصالح سنگدانه‌ای کوارتزی تیزگوشه با دانه‌بندی مصنوعی جهت افزایش دقت و انطباق بیشتر نتایج آزمایشگاهی با ابعاد واقعی ستون سنگی استفاده شده است. دانه‌بندی مصنوعی مطابق با ضوابط طراحی (پوش دانه‌بندی طرح شماره یک) پیشنهادی در کتاب طراحی و ساخت ستون سنگی تهیه شده است، بدین صورت که دانه‌های مخلوط شن و ماسه با رعایت پوش دانه‌بندی پیشنهادی و تبدیل ابعاد واقعی دانه‌ها به ابعاد مدل مورد استفاده قرار گرفت [3].

منحنی دانه‌بندی مصالح ستون سنگی مطابق شکل (۳) است که با توجه به نمودار و بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک (USCS)، مصالح ساخت ستون سنگی در رده GP قرار می‌گیرد. مشخصات مصالح در جدول (۱) ارائه شده است.



(الف) ماسه سیلیسی مورد استفاده در بستر

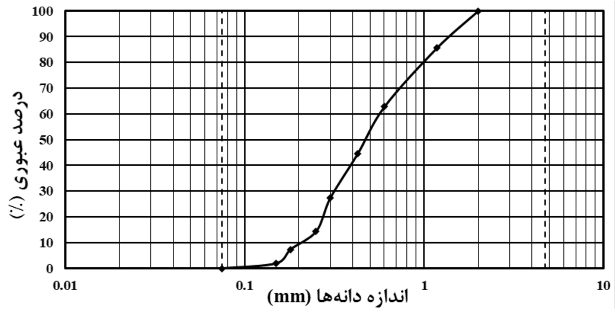


(ب) مصالح درشت‌دانه مورد استفاده در ستون سنگی



(ج) ژئوتکستایل مورد استفاده جهت تسلیح ستون سنگی

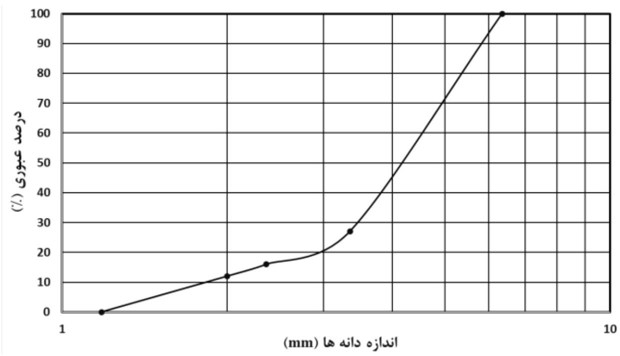
شکل ۱ تصاویر مصالح شن، ماسه و ژئوسنتتیک مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایش




شکل ۲ نمودار دانه‌بندی مصالح بستر ماسه‌ای

جدول ۱ مشخصات مصالح بستر ماسه و ستون سنگی

| پارامتر | مقدار | |
|---|---|---|
| نوع مصالح | ماسه | ستون سنگی |
| USCS | SP | GP |
| $G_s$ | ۲/۶۷ | ۲/۷۲ |
| $D_{10}$ (mm) | ۰/۲۱ | ۱/۹ |
| $C_u$ | ۲/۷۱ | ۲/۲۶ |
| $C_c$ | ۰/۸۵ | ۱/۴۲ |
| $D_r$ | ۵۰٪ | ۶۵/۷ |
| $\gamma_d$ (kN/m$^3$) | ۱۴/۵ | ۱۵/۸۴ |
| $\gamma_{d(max)}$ (kN/m$^3$) | ۱۶/۳۶ | ۱۶/۶۵ |
| $\gamma_{d(min)}$ (kN/m$^3$) | ۱۳/۰۳ | ۱۴/۴۹ |
| c (kPa) | ۳/۴ | ۲/۳ |
| φ (°) | ۳۴/۲ | ۴۸/۳ |




شکل ۳ نمودار دانه‌بندی مصالح ستون سنگی

مصالح ژئوسنتتیکی مورد استفاده برای تسلیح ستون‌های سنگی، از گروه ژئوتکستایل‌ها و از نوع بافته شده می‌باشد که تصویر و مشخصات آن به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات مصالح ژئوتکستایل

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| جرم واحد سطح (g/m$^2$) | ۵۰۶ |
| ضخامت (mm) | ۳/۷۲ |
| مقاومت کششی نهایی (kN/m) | ۱۴/۹۹ |
| کرنش در مقاومت کششی نهایی (٪) | ۳۷/۷ |
| سختی سکانت در کرنش نهایی (kN/m) | ۳۹/۷۶ |

## تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌ها، از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس تمام اتوماتیک ساخت شرکت موادساخت‌آزما استفاده شده است که قابلیت انجام آزمایش بر روی نمونه‌های تا اندازه حداکثر ۱۵برابر $d_{85}$ را داراست. دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس دارای متعلقاتی شامل بدنه اصلی، جعبه برش به ابعاد ۳۰×۳۰×۱۴ سانتی‌متر و جعبه اشباع‌سازی نمونه، سیستم بارگذاری قائم و افقی و سیستم اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات است که نحوه انجام آزمایش مطابق با استاندارد شماره ASTM D-3080 [22] بوده و تمامی مراحل بارگذاری افقی و قائم و نیز قرائت‌های نیرو و تغییر مکان افقی، به صورت خودکار انجام و نتایج ذخیره می‌گردد.

جهت بارگذاری قائم در آزمایش‌ها، از جک هیدرولیکی نصب شده بر روی جعبه برش و اعمال نیرو به صورت کنترل تنش استفاده شده است. نیروی اعمال شده از طرف جک، از طریق شفتی به قطر ۵ سانتی‌متر به صفحه فلزی فوقانی جعبه برش که جهت اعمال یکنواخت نیرو بر روی سطح نمونه ایجاد شده، انجام گرفته است. همچنین بر روی صفحه بالایی، زبانه‌ای به شکل مقعر طراحی شده تا شفت بارگذاری با قرار گرفتن در آن، بار را به مرکز صفحه وارد نماید. جهت اعمال نیروی افقی از موتور الکتریکی که دارای قابلیت تبدیل نیروی الکتریکی به مکانیکی است استفاده شده که تمامی آزمایش‌ها، با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه برای برش نمونه و به صورت کنترل کرنش تحت تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است.

به منظور اندازه‌گیری نیروهای افقی و قائم از نیروسنج‌های الکترونیکی با ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن و دقت اندازه‌گیری ۱۰ نیوتن و برای اندازه‌گیری تغییرمکان‌های افقی و قائم، از دو عدد

جابه‌جایی‌سنج الکترونیکی با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. تصویری از دستگاه آزمایش به همراه متعلقات آن در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

با توجه به نیاز به تعیین وزن مخصوص خشک حداقل ماسه، به همین منظور مطابق استاندارد شماره ASTM D-4254-00 [23]، ماسه به آرامی و بدون لرزش و ضربه توسط قیف استاندارد به صورت دایره‌وار از ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متری از سطح خاک درون ظرف ریخته شده و سپس با صاف کردن سطح لبه قالب و توزین خاک درون قالب و اندازه‌گیری حجم قالب، مقدار وزن مخصوص خشک حداقل ماسه محاسبه گردید. همچنین جهت تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر ماسه مطابق با استاندارد شماره ASTM D-4253-00 [24]، نمونه در ۵ لایه یکسان در داخل قالب مخصوص آزمایش ریخته شد؛ سپس با قرار دادن وزنه‌هایی به میزان تنش ۱۴ کیلوپاسکال بر روی سطح ماسه، هر لایه به مدت زمان ۸ دقیقه، با فرکانس ۶۰ هرتز و دامنه حرکتی ۰/۳۳ میلی‌متر توسط دستگاه میز لرزه متراکم و وزن خاک درون قالب اندازه‌گیری شد. با تقسیم وزن خاک قالب به حجم آن، وزن مخصوص حداکثر ماسه محاسبه گردید.




شکل ۴ تصویری از دستگاه برش مستقیم و متعلقات آن

## آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش با توجه به ابعاد جعبه آزمایش برش، اندازه نمونه‌ها ۳۰*۳۰*۱۴ سانتی‌متر بوده که ستون‌های سنگی مدل شده در بستر ماسه به صورت آرایش تکی و گروهی صورت گرفته، به طوری که ستون‌های سنگی با قطرهای ۷ و ۹ سانتی‌متر با آرایش‌های گروهی مثلثی و مربعی مورد بررسی قرار گرفته است.

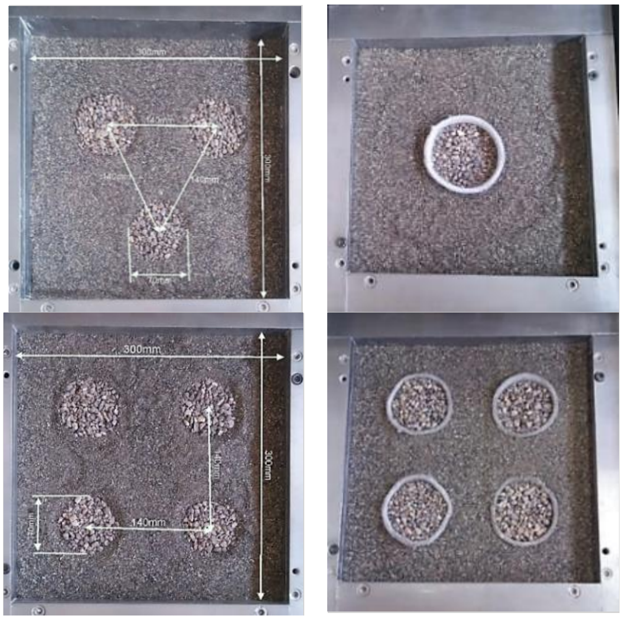
با توجه به فرض دانسیته نسبی ۵۰٪ برای بستر ماسه‌ای نمونه‌ها به منظور ملموس بودن نتایج استفاده از ستون سنگی، جهت ساخت بستر ماسه‌ای از روش ریزش ماسه از ارتفاع مشخص و نرخ ثابت و یکنواخت استفاده شد، به طوری که ارتفاع مناسب برای رسیدن به دانسیته نسبی مورد نظر به روش آزمون و خطا تعیین گردید.

قبل از شروع به ریختن ماسه، برای ساخت ستون‌های سنگی، لوله‌های فلزی به قطرهای مورد نظر را در محل مشخص درون جعبه برش قرار داده و سپس ماسه به آرامی و از ارتفاع معین پیرامون لوله فلزی ریخته می‌شود. پس از آماده‌سازی بستر ماسه‌ای، مصالح ستون سنگی در لایه‌های ۵، ۵ و ۴ سانتی‌متر درون لوله ریخته شده و هر لایه با استفاده از میله توپری به وزن ۱/۵ کیلوگرم و با ارتفاع سقوط ۱۰ سانتی‌متر متراکم می‌شود و این کار به منظور رسیدن به دانسیته نسبی مورد نظر ستون سنگی (۶۵/۷ ٪) به تعداد ۲۰ مرتبه برای هر لایه انجام می‌شود. در مرحله آخر، لوله فلزی به آرامی از درون بستر ماسه‌ای خارج شده و متراکم‌سازی نهایی پس از خروج لوله ادامه یافته تا اینکه نمونه در مرحله انجام آزمایش قرار گیرد.

مراحل آماده‌سازی نمونه ستون‌های سنگی مسلح شده توسط ژئوتکستایل، مشابه حالت غیرمسلح است، با این تفاوت که در این حالت با دوختن لبه‌های ژئوتکستایل به هم و ایجاد و قرارگیری استوانه درون لوله فلزی، نمونه مسلح تهیه می‌گردد. شایان ذکر است که با توجه به اینکه لوله مذکور بعد از ایجاد ستون سنگی از بستر خاک خارج می‌شود؛ بنابراین با اندازه‌گیری وزن مصالح مورد نیاز برای ساخت ستون سنگی و درنظرگیری حجم لوله فلزی از محاسبات، مقدار وزن مخصوص خشک مصالح دانه‌ای و دانسیته نسبی متناظر با آن با کسر حجم لوله محاسبه می‌گردد.

نمونه‌های با گروه ستون سنگی در دو آرایش هندسی به شکل مثلثی و مربعی ساخته شده است، به طوری که فاصله مراکز ستون‌ها از یکدیگر برابر با ۲d می‌باشد (d قطر ستون سنگی است). شکل (۵) تصاویری از نمونه‌های آماده‌سازی شده با آرایش‌های هندسی مختلف را نشان می‌دهد.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی از طریق انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، نمونه‌ها تحت تنش‌های سربار به میزان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال و بارگذاری افقی با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تحت نیروی برش قرار گرفته و نتایج به ازای پارامترهای مختلف مطالعه گردید که بررسی تأثیر پارامترها بر نتایج به تفصیل در بخش نتایج ارائه شده است.



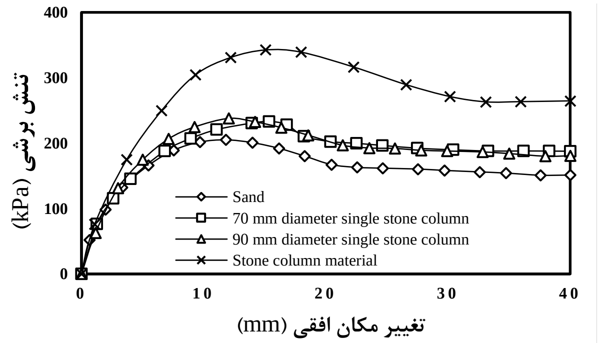

شکل ۵ تصاویری از نمونه‌های آماده‌سازی شده با آرایش‌های مختلف ستون سنگی

## نتایج

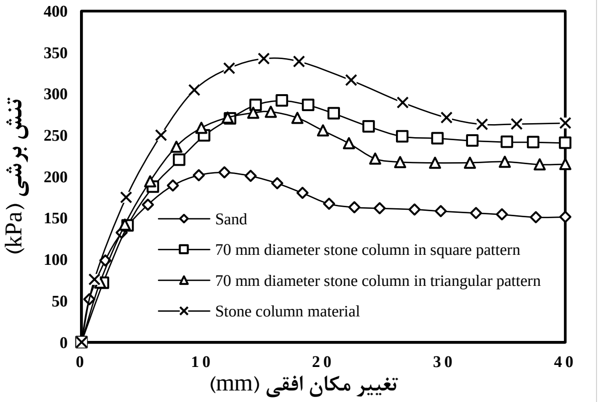
### نتایج آزمایش ستون‌های سنگی غیرمسلح

نتایج آزمایش ستون‌های سنگی غیرمسلح در نمودار شکل‌های (۶) و (۷) برای تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب به ازای ستون‌های تکی و گروهی نشان داده شده است.

همان طوری که از نمودارها قابل مشاهده است، مقاومت برشی بستر بهسازی شده افزایش می‌یابد. دلیل افزایش مقاومت برشی بستر بهسازی شده توسط ستون‌های سنگی غیرمسلح، جایگزینی بخشی از خاک نامرغوب با خاک مرغوب و با مقاومت برشی بیشتر نسبت به بستر ماسه‌ای است. مشاهده می‌شود که رفتار بستر ماسه‌ای بهسازی شده با ستون‌های سنگی به دلیل عدم وجود محصورکننده، مشابه بستر ماسه‌ای بدون ستون سنگی است، به طوری که نمونه‌های آزمایش بعد از رسیدن به نقطه مقاومت حداکثر، رفتار نرم‌شوندگی کرنشی داشته و پس از آن مقاومت برشی باقی‌مانده در مقدار ثابتی قرار می‌گیرد. نتایج گزارش شده توسط سایر محققان نیز چنین رفتار مشابهی را به لحاظ نرم‌شوندگی کرنشی نسبت به بارگذاری نشان دادند [8,10]. در این پژوهش رفتار نرم‌شوندگی کرنشی در همه نمونه‌های آزمایش شده برای ستون‌های سنگی تکی و گروهی غیرمسلح، به ازای تنش‌های سربار مختلف مشاهده گردید.




شکل ۶ تغییرات تنش برشی در تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال برای ستون‌های سنگی تکی محصور نشده




شکل ۷ تغییرات تنش برشی در تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال برای گروه ستون‌های سنگی محصور نشده

در ستون‌های سنگی تکی غیرمسلح، با افزایش میزان $A_r$ (درصد سطح بستر که با ستون‌های سنگی اشغال شده است)، بهبود جزئی در مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی، در مقایسه با خاک بستر بدون ستون به وجود می‌آید که دلیل این امر، جایگزینی مقداری از خاک بستر با خاک مرغوب‌تر و مقاوم‌تر است.

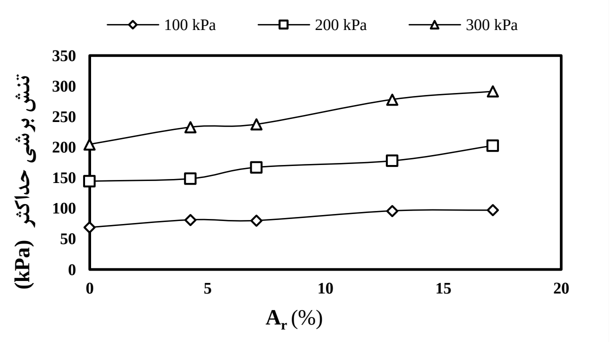
با توجه به خلاصه نتایج پارامترهای مقاومت برشی در جدول (۳)، مشاهده می‌شود که با بهسازی بستر ماسه‌ای توسط ستون‌های سنگی تکی، زاویه اصطکاک داخلی نمونه بهسازی شده، ۳ الی ۴ درجه افزایش می‌یابد که این افزایش برای ستون‌های سنگی تکی مسلح نشده به قطرهای ۷ و ۹ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۸/۷۷٪ و ۱۱/۶۹ ٪ بوده است.

جدول ۳ پارامترهای مقاومت برشی ستون‌های سنگی محصور نشده و غیرمسلح

| حالت ستون سنگی مورد آزمایش | $A_r$ (%) | φ (°) | (kPa) c |
|---|---|---|---|
| ماسه بستر | ۰ | ۳۴/۲ | ۳/۵ |
| ۷ سانتی‌متر تکی | ۴/۲۸ | ۳۷/۲ | ۲/۷ |
| ۹ سانتی‌متر تکی | ۷/۰۷ | ۳۸/۲ | ۴/۱ |
| گروه ۷ سانتی‌متر با آرایش مثلثی | ۱۲/۸ | ۴۲/۳ | ۱/۸ |
| گروه ۷ سانتی‌متر با آرایش مربعی | ۱۷/۱ | ۴۴/۲ | ۲/۶ |
| مصالح ستون سنگی | ۱۰۰ | ۴۸/۳ | ۲/۳ |

با توجه به نتایج جدول (۳) مشاهده می‌شود که به دلیل جایگزینی حجم قابل توجهی از خاک بستر با مصالح ستون سنگی که زاویه اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به ماسه بستر دارد، افزایش ۸ الی ۱۰ درجه‌ای در زاویه اصطکاک داخلی گروه ستون‌های سنگی ملاحظه می‌گردد. میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی نسبت به بستر ماسه‌ای در هر یک از گروه‌های ستون سنگی با اندازه قطر ۷ سانتی‌متری و برای آرایش‌های مثلثی و مربعی به ترتیب برابر با ۲۳/۶۸٪ و ۲۹/۲۳٪ بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که مصالح مرغوب و با زاویه اصطکاک داخلی بیشتر و همچنین محصورسازی جانبی ماسه توسط ستون‌های سنگی، باعث افزایش ظرفیت باربری ستون‌های سنگی می‌شود [12]. در ستون‌های سنگی غیرمسلح برخلاف افزایش زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی نمونه‌های مورد آزمایش، به دلیل عدم محصورشدگی ستون‌ها و عدم چسبندگی مصالح ستون سنگی، تقریبا ثابت باقی مانده و افزایشی مشاهده نگردید.

تغییرات حداکثر مقاومت برشی نسبت به تغییرات $A_r$، برای ستون‌های سنگی غیرمسلح در نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد که در همه حالت‌ها، با افزایش میزان $A_r$، مقاومت برشی به ازای تنش‌های سربار مختلف افزایش می‌یابد ولی در گروه ستون‌های سنگی به دلیل حجم بیشتر جایگزینی خاک بستر با مصالح مقاوم ستون سنگی و همچنین تأثیر هم‌افزایی محصورشدگی ایجاد شده توسط ستون‌ها بر ماسه میان آن‌ها، این افزایش مقاومت در میزان تنش برشی، بیشتر و محسوس‌تر است. نمودار همچنین نشان می‌دهد در ستون‌های سنگی غیرمسلح با افزایش قطر و تعداد ستون‌ها و محصورشدگی احتمالی خاک بستر مابین ستون‌های سنگی توسط ستون‌ها، ظرفیت باربری جانبی افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که مقاومت برشی خاک بهسازی شده با ستون سنگی، نسبت به حالت خاک بدون ستون سنگی، افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند [4].



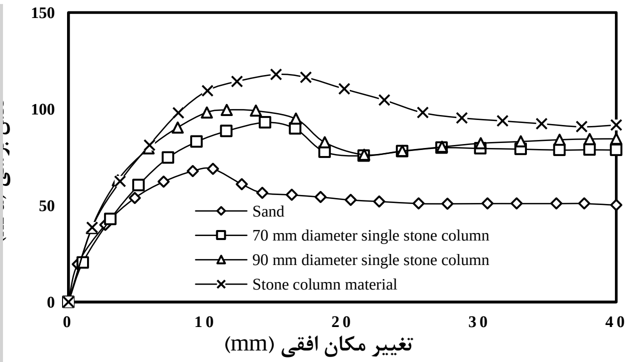

شکل ۸ تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییرات (٪) $A_r$ به ازای تنش‌های سربار مختلف برای انواع ستون‌های سنگی غیرمسلح

## نتایج آزمایش ستون‌های سنگی مسلح

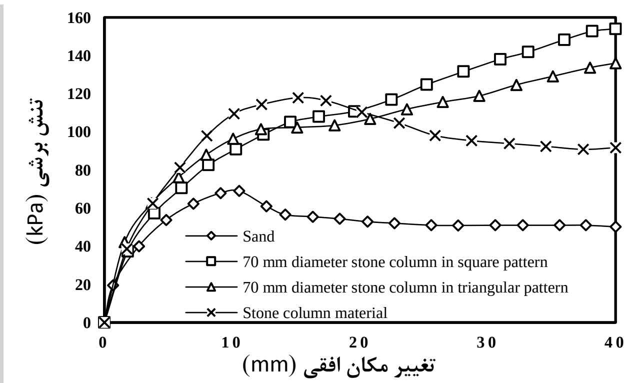
نتایج آزمایش ستون‌های سنگی تسلیح شده با ژئوتکستایل در نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) به ازای تنش سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل (۹) مشاهده می‌شود که مقاومت حداکثر ستون‌های سنگی تکی مسلح، نسبت به حالت ماسه بستر افزایش مقاومت برشی داشته است. همچنین مطابق نمودار شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که سختی اولیه گروه ستون‌های سنگی نسبت به ماسه بستر افزایش یافته و مقاومت برشی نیز افزایش چشم‌گیری داشته است. دلیل این افزایش مقاومت در ستون‌های سنگی تکی و گروهی، جایگزینی خاک بستر با مصالح ستون سنگی و وجود

محصورکننده‌های ژئوتکستایل است که این محصورکننده‌ها با بسیج تنش‌های کششی و عدم گسیختگی در تغییرمکان‌های بزرگ، موجب افزایش مقاومت برشی ناشی از چسبندگی ظاهری در نمونه‌های ستون سنگی شده‌اند.

با توجه به منحنی‌های شکل‌های فوق مشاهده می‌شود که رفتار ستون‌های سنگی مسلح برخلاف ماسه بستر و ستون‌های سنگی غیرمسلح تغییر رفتار داده و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نشان می‌دهند و با افزایش تغییرمکان افقی، افزایش مقاومت باقی‌مانده در نمونه‌های مورد آزمایش مشاهده می‌شود. این نوع تغییر رفتار از حالت نرم‌شوندگی به سخت‌شوندگی در همه ستون‌های سنگی مسلح و به ازای تنش‌های سربار مختلف ملاحظه می‌شود. دلیل این رفتار، می‌تواند به وجود محصورکننده‌های ژئوتکستایل و بسیج نیروهای کششی از طرف ژئوتکستایل‌ها نسبت داده شود. رفتار سخت‌شوندگی کرنشی در نمونه‌های ستون سنگی مسلح شده با انواع ژئوسنتتیک، در تحقیقات محققان دیگر نیز مشاهده شده است [7,8,10].




شکل ۹ تغییرات تنش برشی به ازای تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال در ستون‌های سنگی تکی محصور شده




شکل ۱۰ تغییرات تنش برشی به‌ازای تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال برای گروه ستون‌های سنگی محصورشده

خلاصه نتایج پارامترهای مقاومت برشی ستون‌های سنگی محصور شده برای حالت‌های مختلف در جدول شماره (۴) ارائه شده است. بر اساس نتایج ملاحظه می‌گردد که در ستون‌های سنگی تکی مسلح با افزایش $A_r$، چسبندگی به مقدار مناسبی افزایش پیدا کرده است که بیانگر ایجاد چسبندگی ظاهری به دلیل اثرات محصورکنندگی ژئوتکستایل می‌تواند باشد. با این حال میزان چسبندگی در گروه ستون‌های سنگی مسلح نسبت به حالت تکی و بستر ماسه‌ای، افزایش چشم‌گیر و چند برابری داشته است که دلیل عمده افزایش بیشتر می‌تواند علاوه بر تأثیر افزایش چسبندگی ناشی از وجود محصورکننده ژئوتکستایل در ستون سنگی، به تأثیر هم‌افزایی محصورکنندگی ماسه بستر بین گروه ستون‌های سنگی ایجاد شده توسط ستون‌های سنگی اشاره کرد.

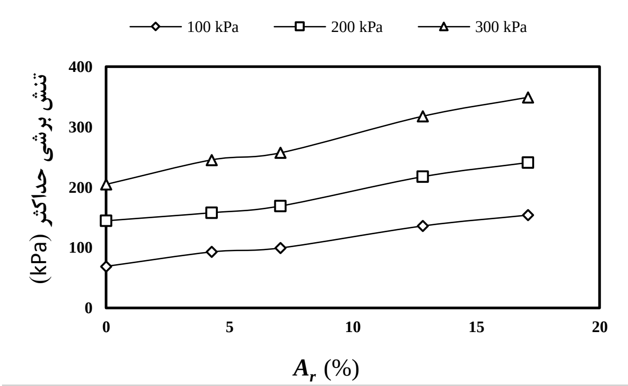
جدول ۴ پارامترهای مقاومت برشی ستون‌های سنگی محصور شده و مسلح

| حالت ستون سنگی مورد آزمایش | $A_r$ (%) | φ (°) | c (kPa) |
|---|---|---|---|
| ماسه بستر | ۰ | ۳۴/۲ | ۳/۵ |
| ۷ سانتی‌متر تکی | ۴/۲۸ | ۳۷/۳ | ۱۲/۹ |
| ۹ سانتی‌متر تکی | ۷/۰۷ | ۳۸/۲ | ۱۷/۵ |
| گروه ۷ سانتی‌متری با آرایش مثلثی | ۱۲/۸۳ | ۴۲/۳ | ۴۱/۹ |
| گروه ۷ سانتی‌متری با آرایش مربعی | ۱۷/۱۰ | ۴۴/۳ | ۵۲/۷ |
| مصالح ستون سنگی | ۱۰۰ | ۴۸/۳ | ۲/۳ |

میزان افزایش چسبندگی ستون‌های سنگی تکی مسلح به قطرهای ۷ و ۹ سانتی‌متر نسبت به ماسه بستر به ترتیب برابر با ۹/۴ و ۱۴ کیلوپاسکال معادل ۲/۶۸ و ۳ برابر است. برای گروه ستون‌های به قطر ۷ سانتی‌متر و آرایش مثلثی و مربعی به ترتیب برابر با ۳۸/۴ و ۴۹/۲ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شده است که با فرض مساحت سطح یکسان، دلالت بر افزایش چسبندگی متوسطی در حدود ۶۰٪ است. برخلاف حالت ستون‌های سنگی غیرمسلح، زاویه اصطکاک داخلی ستون‌های سنگی مسلح نسبت به حالت‌های مشابه غیرمسلح تغییر محسوسی نداشته است، اما نسبت به ماسه بستر (همانند حالت غیرمسلح) افزایش داشته است، میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی ستون‌های سنگی تکی مسلح نسبت به ماسه بستر، به ترتیب برابر با ۳ الی ۴ درجه است. برای گروه ستون‌های به قطر ۷ سانتی‌متر و آرایش مثلثی و مربعی به ترتیب برابر با ۴ الی ۱۰ درجه افزایش یافته

است. دلیل افزایش مقاومت برشی در حالت‌های مسلح، تأمین فشار محصورکننده از طرف ژئوتکستایل‌ها و همچنین به کشش افتادن ژئوتکستایل‌ها در اثر تغییرمکان افقی است که باعث بسیج نیروهای کششی و در نتیجه افزایش چسبندگی مجازی در نمونه مورد آزمایش شده است. نتایج سایر محققان نیز نشان داد که ظرفیت باربری و سختی ستون‌های سنگی با محصور کردن آن‌ها افزایش یافته و موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی زمین بهسازی شده می‌شود [11,13].

نمودار شکل (۱۱) تغییرات مقاومت برشی را نسبت به مقادیر $A_r$ بستر ماسه‌ای ستون‌های سنگی مسلح نشان می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر $A_r$، مقدار مقاومت برشی نمونه‌ها به ازای تنش‌های سربار مختلف نسبت به ماسه بستر افزایش چشم‌گیری داشته است. دلیل افزایش مقاومت برشی در نمونه‌های ستون سنگی مسلح شده نسبت به ماسه بستر، علاوه بر افزایش مقادیر $A_r$ وجود محصورکننده ژئوتکستایل در ستون‌های تکی و محصورکنندگی خود ستون‌های سنگی در حالت گروهی است که با فراهم کردن محصورشدگی جانبی برای ستون‌های سنگی و همچنین تأمین نیروی کششی در تغییرمکان‌های بیشتر، باعث افزایش بیشتر در مقاومت برشی نمونه‌ها شده است.




شکل ۱۱ تغییرات مقاومت برشی نسبت به مقادیر $A_r$(٪) به ازای تنش‌های سربار مختلف

در شکل (۱۱) افزایش مقاومت برشی در ستون‌های سنگی تکی و گروه ستون‌ها مشاهده می‌شود، اما در ستون‌های سنگی تکی، افزایش مقاومت برشی با بیشتر شدن قطر ستون‌ها کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع کاهش تنش کششی ایجاد شده در ژئوتکستایل با افزایش قطر آن است. افزایش قطر ستون‌های سنگی، باعث کاهش اثر محصورکنندگی ژئوسنتتیکی می‌شود؛ با این وجود در نهایت ظرفیت باربری ستون سنگی را افزایش می‌دهد [10,12].

## بررسی مکانیزم محصورکنندگی و تفسیر نتایج

شکل (۱۲) تصویر نمونه‌های آزمایش شده در وضعیت تغییرشکل یافته ستون سنگی مسلح شده با ژئوتکستایل را نشان می‌دهد که با تزریق دوغاب سیمان زودگیر تهیه شده است. ملاحظه می‌شود که با توجه به مقاومت کششی و برشی محصورکننده ژئوتکستایل و عدم گسیختگی آن در اثر اعمال نیرو و تغییرمکان افقی، ستون سنگی به دلیل انعطاف زیاد ژئوتکستایل، تحت تغییرشکل خمشی در صفحه برش قرار گرفته است و به خوبی چسبندگی ظاهری ایجاد شده ناشی از ژئوتکستایل را نمایش می‌دهد.

با توجه به افزایش مقاومت برشی ناشی از ستون‌های سنگی ایجاد شده در بستر ماسه و محصورسازی ستون‌های سنگی توسط ژئوسنتتیک‌ها، می‌توان دلایل اصلی میزان بهبود و بهسازی را بدین صورت تفسیر کرد: ۱) افزایش مقاومت برشی می‌تواند ناشی از ایجاد چسبندگی ظاهری بین مصالح ناشی از اثرات محصورکنندگی باشد، ۲) کرنش ژئوسنتتیک‌ها در طول جابه‌جایی برشی می‌تواند باعث محصورسازی بیشتر و ایجاد مقاومت برشی اضافی گردد و ۳) اثر محصورسازی جانبی ناشی از وجود ستون‌های سنگی مجاور در خاک حد فاصل میان گروه ستون‌های سنگی، می‌تواند باعث افزایش مقاومت بیشتر نسبت به ستون‌های تکی گردد.



شکل ۱۲ نمونه تغییرشکل یافته ستون سنگی مسلح

## بررسی قوانین مقیاس

در رابطه با قوانین شبیه‌سازی و بررسی اثرات مقیاس در مدل‌های کوچک مقیاس نسبت به مدل‌های واقعی، موضوعات اندازه دانه‌ها، ابعاد جعبه آزمایش و منحنی دانه‌بندی حائز اهمیت است که مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق مراجع و تحقیقات مختلف [27-25]، به منظور اجتناب از اثرات مقیاس اندازه دانه‌ها بر نتایج مدل‌سازی، در تعیین پارامترهای مقاومت برشی حداقل نسبت اندازه نمونه به حداکثر اندازه دانه‌ها، بایستی بزرگ‌تر از حدود شش برابر رعایت گردد که با توجه به اینکه اندازه بزرگ‌ترین دانه مصالح مورد استفاده در ستون سنگی حدود ۶ میلی‌متر و اندازه مدل آزمایش ۳۰۰ میلی‌متر بوده است، بنابراین نسبت اندازه مدل به اندازه دانه‌ها حدود ۵۰ برابر به دست می‌آید که بسیار بیشتر از حداقل مقدار است و در این مورد تأثیر قابل توجهی بر نتایج نخواهد داشت. در رابطه با قوانین شبیه‌سازی اندازه دانه‌ها در مدل و پروتوتایپ، یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های تبدیل اندازه دانه‌ها برای رسیدن به پاسخ مشخصات مکانیکی سازگار میان مصالح مدل و پروتوتایپ، روش دانه‌بندی موازی توسعه یافته توسط لاو (۱۹۶۴) است که در این مطالعه نیز با بهره‌گیری از این روش، منحنی دانه‌بندی مدل مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است [27].

## خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به ضعف برشی ستون‌های سنگی به دلیل عدم محصورشدگی کافی، رفتار ستون‌های سنگی مسلح شده توسط ژئوتکستایل واقع در بستر خاک ماسه‌ای از طریق انجام آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ‌مقیاس به ویژه با تمرکز بر تنش سربار بزرگ‌تر متناسب با کارهای اجرایی، مورد مطالعه قرار گرفته و روند تغییرات مقاومت برشی نمونه‌های فیزیکی ستون سنگی به صورت تکی و گروهی ارزیابی شد که خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج به صورت ذیل ارائه می‌گردد:

۱. رفتار نمونه‌های بهسازی شده از طریق ستون‌های سنگی تکی و گروهی غیرمسلح، به‌دلیل عدم تأمین فشار کافی محصورکنندگی از طرف خاک سست بستر، همانند بستر ماسه‌ای بدون ستون سنگی است. این نمونه‌ها بعد از رسیدن به حالت مقاومت برشی حداکثر، رفتار نرم‌شوندگی کرنشی از خود نشان می‌دهند.

۲. در بستر بهسازی شده با ستون‌های سنگی تکی غیرمسلح، با افزایش قطر ستون‌ها، بهبود در مقاومت برشی با افزایش ۳ الی ۴ درجه‌ای زاویه اصطکاک داخلی حاصل گردید و در بستر بهسازی شده با گروه ستون‌های سنگی غیرمسلح با آرایش‌های هندسی مثلثی و مربعی، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به بستر بدون ستون سنگی، به میزان ۸ الی ۱۰ درجه افزایش مشاهده شد. مقادیر چسبندگی در نمونه‌های بهسازی شده بستر ماسه‌ای با ستون‌های سنگی غیرمسلح، به دلیل عدم محصورشدگی ستون‌ها و عدم چسبندگی مصالح ستون سنگی، تقریبا ثابت باقی ماند.

۳. استفاده از ستون سنگی غیرمسلح در بستر ماسه سست با سطح مقطعی تا حدود ۱۷٪ سطح ماسه، باعث افزایش حدود ۱۲٪ زاویه اصطکاک داخلی ماسه برای ستون تکی و افزایش ۲۶٪ برای حالت گروه ستون و عدم افزایش چسبندگی شده است. دلیل این امر می‌تواند جایگزینی مقداری از خاک سست بستر با مصالح مقاوم ستون سنگی و تأثیر احتمالی محصورسازی جانبی ناشی از خود ستون‌های مجاور در خاک بستر باشد.

۴. بر خلاف نمونه‌های غیرمسلح، در همه حالت‌های بستر بهسازی شده با ستون‌های سنگی مسلح، پس از رسیدن نمونه‌ها به مقاومت برشی حداکثر، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی مشاهده شد. دلیل این رفتار وجود محصورکننده‌های ژئوتکستایل و بسیج نیروهای کششی از سوی آن‌ها در تغییرمکان‌های بیشتر و ایجاد مقاومت بیشتر است.

۵. ستون‌های سنگی تکی مسلح باعث افزایش مقاومت برشی بستر ماسه‌ای می‌شود. این افزایش مقاومت برشی که با افزایش قطر ستون‌ها همراه است، ناشی از بهبود پارامترهای مقاومتی خاک از جمله زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه است، به‌طوری که استفاده از ستون‌های سنگی تکی مسلح، موجب افزایش ۳ الی ۴ درجه‌ای در زاویه اصطکاک داخلی و ۹/۴ الی ۱۴ کیلوپاسکال در چسبندگی بستر ماسه‌ای شده که بیانگر افزایش قابل توجه در میزان چسبندگی تا حدود ۳ برابری می‌باشد.

۶. در گروه ستون‌های سنگی مسلح، با افزایش سطح جایگزین شده خاک بستر با ستون‌های سنگی، زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها نسبت به حالت بدون تسلیح بهبود جزئی نشان داده است، لیکن میزان چسبندگی نمونه خاک افزایش چشم‌گیری به مقدار متوسط حدود ۶۰٪ به ازای سطح یکسان ستون سنگی به نمایش گذاشته که این افزایش چسبندگی، ناشی از اثر مقاومت کششی محصورکننده‌ها در تغییرمکان‌های بزرگ و همچنین تأثیر محصورسازی جانبی خود ستون‌ها برای ماسه بستر است. برای گروه ستون‌های سنگی مسلح به ازای پارامترهای مختلف میزان و صرف نظر از میزان نسبت سطح ستون‌های سنگی، چسبندگی تا ۵ برابر حالت غیرمسلح افزایش نشان داده است.

## واژه‌نامه

| | |
|---|---|
| ژئوتکستایل | Geotextile |
| ستون سنگی | Stone column |
| ژئوسنتتیک | Geosynthetic |
| بهسازی | Improvement |
| سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک | USCS |
| انجمن آزمایش مصالح امریکا | ASTM |
| درصد مساحت ستون سنگی نسبت به بستر ماسه | $A_r$ |
| ماسه بد دانه‌بندی شده | SP |
| شن بد دانه‌بندی شده | GP |
| دانسیته نسبی | $D_r$ |
| چگالی ویژه | $G_s$ |
| وزن مخصوص خشک | $\gamma_d$ |
| وزن مخصوص خشک بیشینه | $\gamma_{dmax}$ |
| وزن مخصوص خشک کمینه | $\gamma_{dmin}$ |
| اندازه مؤثر | $D_{10}$ |
| ضریب یکنواختی | $C_u$ |
| ضریب خمیدگی | $C_c$ |
| چسبندگی | c |
| زاویه اصطکاک داخلی خاک | φ |
| کیلو پاسکال | kPa |

## سپاسگزاری

## مراجع


[1] R. Rezvani, M. Azizi, P. Nopars, and A. Nabizadeh, "Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand," *Journal of Ferdowsi Civil Enginnering*, vol. 33, no. 2, pp. 55-70, 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v33i2.85864

[2] S. Gholipour, and M. Makarchian, "Experimental and Numerical Study of Load-Bearing and Settlement Behavior of Circular Skirted foundations Compared to other Types of Foundations," *Journal of Ferdowsi Civil Enginnering*, vol. 33, no. 3, pp. 85-104, 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22067/jfcei.2021.61489.0

[3] R. D. Barksdale, and R. C. Bachus, "Design and Construction of Stone Columns," *Federal Highway Administration*, vol. 1, no. FHWA/RD-83/026, 1983.

[4] D. M. Wood, W. Hu, and D. F. T. Nash, "Group Effects in Stone Column Foundations: Model Test," *Geotechnique*, vol. 50, pp. 689-698, 2000. https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.689

[5] N. Mehrannia, J. Nazariafshar, F. Kalantary, "Experimental Investigation on the Effect of Geometry and Reinforced Floating Stone Columns on Bearing Capacity," *Journal of Ferdowsi Civil Enginnering*, vol. 31, no. 2, pp. 74-88, 2018. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v31i2.57449

[6] M. Hajiazizi, and M. Nasiri, “Experimental and Numerical Investigation on Stability of Reinforced Sandy Slope using Reinforced Stone Column with Horizontally Laminated Geotextile Disks,” *Journal of Ferdowsi Civil Enginnering*, vol. 32, no. 1, pp. 55-72, 2019. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v32i1.62412

[7] S. N. Malarvizhi, and K. Ilamparuthi, “Load Versus Settlement of Clay Bed Stabilized with Stone & Reinforced Stone Columns,” *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Korea, 2004, pp. 322-329.

[8] S. R. Mohapatra, K. Rajagopal, and J. Sharma, “Direct Shear Tests on Geosynthetic-Encased Granular Columns,” *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 44, pp. 396-405, 2016. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.01.002

[9] S. Ghaffarpour, S. Gharbanbeygi, M. Yaghoubi, “Evaluation of Distinct Factor Affecting the Bearing Capacity in Ground Improvement with Stone Column Group,” *Journal of Ferdowsi Civil Enginnering*, vol. 32, no. 1, pp. 137-150, 2019. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v32i1.61713

[10] S. Murugesan, and K. Rajagopal, “Model Test on Geosynthetics-Encased Stone Column,” *Journal of Geoseynthetics International*, vol. 14, pp. 346-354, 2007. https://doi.org/10.1680/gein.2007.14.6.346

[11] M. Ghazavi, and J. N. Afshar, “Bearing Capacity of Geosynthetic Encased Stone Columns,” *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 38, pp. 26-36, 2013. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.04.003

[12] L. Keykhosropur, A. Soroush, and R. Imam, “3D Numerical Analyses of Geosynthetic Encased Stone Columns,” *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 35, pp. 61-68, 2012. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.07.005

[13] C. S. Wu, and Y. S. Hong, “Laboratory Tests on Geosynthetic-Encapsulated Sand Columns,” *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 2, pp. 107-120, 2009. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.09.003

[14] S. A. Naeini, and N. Gholampoor, “Effect of Geotextile Encasement on the Shear Strength Behavior of Stone Column-Treated Wet Clays,” *Indian Geotechnical Journal*, vol. 49, pp. 292–303, 2019. https://doi.org/10.1007/s40098-018-0329-z

[15] G. Zheng, X. Yu, H. Zhou, et al. “Stability Analysis of Stone Column-Supported and Geosynthetic-Reinforced Embankments on Soft Ground,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 48, no. 3, pp. 349-356, 2020. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.12.006

[16] M. Miranda, and A. l. Costa, “Laboratory Analysis of Encased Stone Columns,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 44, no. 3, pp. 269-277, 2016. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.12.001

[17] S. Naskar, S. K. Gupta, A. K. Choudhary, and K. K. Sharma, “3D Finite Element Analysis of Stone Column Behaviour in Layered Soil with Geosynthetic Reinforced Soil Beds,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09322-w

[18] A. O. Elwakeel, and R. M. Elsherbini, “Effect of Column Material Internal Angle of Friction and the Geotextile Stiffness on the Behavior of Group of Geosynthetic-Encased Stone Column,” *Indian Geotechnical Journal*, 2024. https://doi.org/10.1007/s40098-024-01005-5

[19] N. M. Pradeep, K. Suresh, G. Sanjoli, and N. Mayank, “Behavior of Group of Geosynthetic encased Granular Piles with Tire Chips- Aggregates Mixture under Static and Cyclic Loading–A Model Study,” *Construction and Building Materials*, vol. 431, 2024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136507

[20] S. L. Abishikth, and A. R. Sudha, “A Study on the Inclusion of Geosynthetic to Clayey Soil Improved using Stone Column,” *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, vol. 2, no. 6, 2022. https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.90055.1323

[21] R. Dinarvand, and A. Ardakani, “Behavior of Geosynthetic-encased Granular Column in Silty Sand Soil by Direct Shear Test,” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 50, no. 5, pp. 961-972, 2018. (In Persian) https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12979.5308

[22] ASTM D-3080 “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions,” *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, 2004. https://doi.org/10.1520/D3080_D3080M-23

[23] ASTM D-4254 “Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density,” *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, 2016. https://doi.org/10.1520/D4254-16

[24] ASTM D-4253, “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils using a Vibratory Table,” *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, 2016. https://doi.org/10.1520/D4253-16E01

[25] N. D. Marachi, C. K. Chan, and H. B. Seed, “Evaluation of Properties of Rockfill Materials,” *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ASCE)*, vol. 98, no. sm1, pp. 95-114, 1972. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001735

[26] J. N. Stoeber, “*Effects of Maximum Particle Size and Sample Scaling on the Mechanical Behavior of Mine Waste Rock; a Critical State Approach*,” Master's Thesis, Colorado State University, Fort Collins, USA, 2012.

[27] J. Lowe, “Shear Strength of Coarse Embankment Dam Materials,” *Proceedings from the 8th International Congress on Large Dams*, Paris, France, vol. 3, pp. 745-761, 1964.